

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

**Návrh a realizace PID regulátoru na fyzikálním
modelu magnetické levitace pomocí
kompaktního programovatelného automatu
WinPac-8000**

**Design and Implementation of PID Controller on
Magnetic Levitation Model using Programmable
Compact Controller WinPac-8000**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6. 5. 2011

.....

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat panu Ing. Štěpánu Ožanovi, Ph.D. za konzultace, cenné rady a připomínky, které mi poskytl při řešení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a důvěru při studiu na vysoké škole.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu regulátoru pro fyzikální model magnetické levitace. Popisuje princip magnetické cívky, která přitahuje ocelovou kuličku v magnetickém poli. PSD regulátor je realizován na programovatelném automatu WinPac-8000 ve vývojovém prostředí RexDraw. Návrh regulátoru je proveden pomocí matic popisujících soustavu.

Práce je realizována na fyzikálním modelu magnetické levitace. Tento model je určen k výukovým účelům. Model je propojen konektorem Cannon9 s programovatelným automatem WP-8841.

Klíčová slova:

magnetická levitace, Regulátor, PSD, WP-8841, RexDraw,

Abstract:

This Bachelor's Thesis deals with problematics how to design controller for physical model of magnetic levitation. It describes principle of magnetic coils which magnetize steel ball in magnetic field. PSD controller is realized in programmable automat WinPac-8000 in development environment RexDraw. Design of controller consists of matrices which describe system.

Thesis is realized on a physical model of magnetic levitation. This model is intended for educational purposes. Model is connected by connector Cannon9 with programmable automat WP-8841.

Keywords:

magnetic levitation, controller, PSD, WP-8841, RexDraw,

Seznam použitých symbolů a zkratek

u	vstupní napětí modelu	[V]
k_{DA}	zesílení převodníku	[V/MU]
u_0	offsetová hodnota napětí	[V]
k_{am}	zesílení zesilovače	[-]
k_i	zesílení zesilovače a cívky	[A/V]
T_a	časová konstanta zesilovače	[s]
R	odpor cívky	[ohm]
R_s	odpor zpětné vazby	[ohm]
L	indukčnost cívky	[H]
F_g	gravitační síla	[N]
F_m	magnetická síla	[N]
F_a	síla výsledného zrychlení	[N]
i	proud tekoucí cívkou	[A]
x	poloha kuličky	[m]
x_0	polohový offset cívky	[m]
k_c	konstanta cívky	[A/V]
m_k	hmotnost kuličky	[kg]
g	gravitační zrychlení	[m/(s*s)]
k_x	zesílení senzoru	[V/m]
y	výstupní napětí senzoru	[V]
y_0	offsetová hodnota napětí	[V]
y	výstupní napětí senzoru	[V]
y_{MU}	vstupní napětí do převodníku	[V]
k_{AD}	zesílení převodníku	[MU/V]
y_{MU0}	offsetová hodnota napětí	[V]
i_{00}	ustálený proud cívky v rovnovážné poloze při dané poloze kuličky	[A]
x_{00}	daný linearizační bod polohy kuličky	[m]
U_{MU0}	ustálená hodnota vstupní akční veličiny	[V]
e	regulační odchylka	
$G(s)$	přenos soustavy	
$R_R(z)$	diskrétní přenos soustavy	

Obsah

Úvod	1
1 Spojité a diskrétní řízení	2
1.1 Spojité řízení	2
1.2 Diskrétní řízení	3
2 Návrh PSD regulátoru	4
2.1 PIDf regulátor	6
2.2 Přepoččet na PSD regulátor	7
2.3 Simulace	7
3 Popis laboratorního modelu	8
3.1 Parametry reálného modelu magnetické levitace	11
3.2 Kabelové propojení soustavy s PLC	12
4 Programovatelný automat WinPAC – 8000	12
4.1 Použité moduly	13
4.1.1 I-8017HW analogové vstupy	13
4.1.2 I-8024W analogový výstup	14
4.2 Prostředí řídicího systému REX	14
4.3 Použité funkční bloky	14
5 Realizace PID regulátoru na soustavě magnetické levitace v systému REX	18
5.1 Navržený PSD regulátor	19
5.2 RexView	20
6 Vizualizace	23
6.1 PROMOTIC	23
6.2 PROMOTIC - historie	23
6.3 Editor obrazů	24
6.4 Menu a nástrojová lišta editoru aplikace	24
6.5 OPC Server- Zadávání proměnných	25
Závěr	29
Použitá literatura	30
Přílohy	31

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá regulací magnetické levitace ocelové kuličky. Ocelovou kuličku nadnáší elektromagnetická cívka a výška kuličky se měří indukčním senzorem.

Systém se skládá z cívky vytvářející magnetické pole, v němž levituje kovová kulička. K měření vzdálenosti je použit indukční senzor. Na vstupu a výstupu ze soustavy jsou zakomponovány A/D a D/A převodníky usnadňující komunikaci s regulátorem. Cílem regulace je regulovat pozici kuličky na žádanou hodnotu v určité vzdálenosti od cívky. Proud cívky je vytvořen zesilovačem, který je přímo-úměrný vstupnímu napětí soustavy. WinPac-8000 je propojen s internetovou sítí komunikačním rozhraním TCP/IP. Model s programovatelným automatem je propojen pomocí konektoru Canon9 umístěným na konstrukci modelu a signálovými svorkami automatu.

V první části se seznámíme s druhy regulátorů, což mohou být diskrétní nebo spojité. Hlavní zaměření bude věnováno diskrétní regulaci, o které se budu ještě zmiňovat, jelikož řízení tohoto modelu bude stavěno na této diskrétní regulaci.

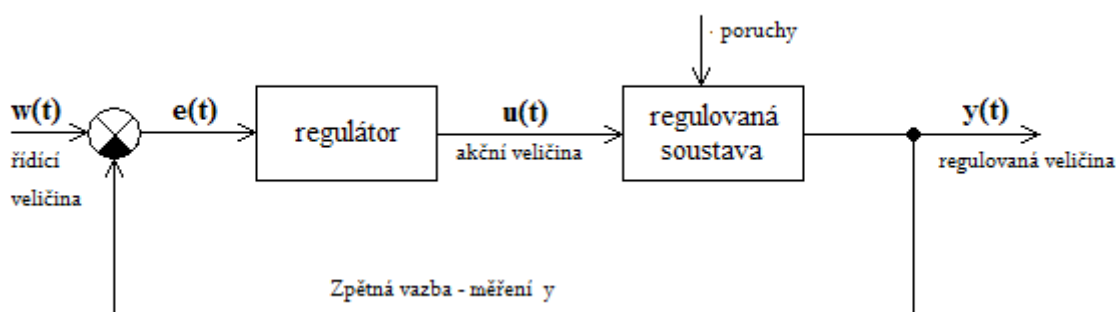
Systém Rex je sice kompatibilní se systémem MATLAB Simulink, ale některé bloky v těchto dvou systémech jsou odlišné anebo mohou vypadat stejně, ale jejich vnitřní stavba je jiná. I když matematický model může souhlasit, tak skutečnost stálé nestability dokáže přesvědčit o rozdílu těchto systémů.

Abychom porozuměli této problematice, je nutno se seznámit se spojitým a na něho navazujícím diskrétním řízením. Bez těchto znalostí by bylo velmi obtížné nastavit soustavu a regulátor tak, aby pracoval správně.

1 Spojité a diskrétní řízení

1.1 Spojité řízení

Jinak také analogové řízení se vyznačuje tím, že ovlivňuje řízený objekt akčními veličinami spojitě proměnnými v čase a rovněž informace o řízení objektu zpracovává jako spojitě proměnné v čase. Takto spojený regulátor s řízeným objektem vytváří systém charakterizován dynamickými vlastnostmi podstatě odlišnými od vlastního řízeného objektu. Zpětné vazby spojitého systému jsou příčinou vzniku zcela specifických dynamických problémů, jako je kmitavost a v některých případech i nestabilita. I přes tyto problémy se z větší části používají obvody zpětnovazební, kvůli potřebám zjišťování aktuální hodnoty řízeného objektu. [5]



Obr. 1 - Základní schéma regulačního obvodu

Základem řídicího systému je působit regulátorem na regulovanou soustavu tak, aby výsledek řízení byl v souladu s cílem řízení. Regulátor může kvalitněji plnit svou funkci, pokud je informován o poruchách a stavu řízeného objektu pomocí zpětné vazby. Cílem regulace je, aby se žádaná veličina $w(t)$ co nejvíce podobala (ideálně byla rovna) skutečné veličině bez ohledu na poruchy a nepříznivé vlivy působící na soustavu *Obr. 1*. [4]

$$e = w(t) - y(t)$$

V principu se jedná o to, aby regulační odchylka v ustáleném stavu byla nulová.

Přenos PID regulátoru

$$G(s) = k_p + k_i * \frac{1}{s} + k_d * s \dots \dots \dots (1)$$

Regulátory se dají dělit na přímé (nepotřebují ke své činnosti přívod energie) a nepřímé (potřebují ke své činnosti externí zdroj energie). Nepřímé regulátory jsou nejčastěji používané kvůli snadné realizaci funkcí a hlavně dálkovému přenosu signálu. U spojitých regulátorů jsou všechny regulátory spojitě v čase.

Podle toho, kterou z konstant položíme rovno nule, dostaneme základní druhy regulátoru: P regulátor, I regulátor, D regulátor a kombinované regulátory PD, PI, PID. Derivační složka se používá pouze u kombinovaných regulátorů, protože by regulátor nic nevěděl o skutečné hodnotě regulační odchylky, neboť na vstupu je signál roven první derivaci. Dále do kombinovaných regulátorů můžeme zakomponovat filtr, který má vliv u nelineárních a nestabilních soustav.[13]

1.2 Diskrétní řízení

Od spojitého řízení se liší tím, že nevytváří trvalou vazbu mezi spojitým pohybem regulované veličiny $y(t)$ a odtud odvozeným rovněž spojitým pohybem akční veličiny $u(t)$. Toto nepřetržité sledování zpětné vazby není nezbytně nutné. Regulátor může také pracovat tak, že regulovanou veličinu bude zjišťovat pouze ve vybraných okamžicích v takzvaných vzorcích. Zpětná vazba mimo vzorkovací frekvenci pro soustavu prakticky neexistuje, z tohoto důvodu se tento princip řízení nazývá diskrétní[5]

Vzorkovací člen mění spojitý signál na diskrétní. Nejjednodušeji si lze představit tento člen jako spínací kontakt s vyznačenou periodou vzorkování. Výstupním signálem vzorkovače je posloupnost impulzů zanedbatelně malé šířky. Ideální by bylo, kdyby šířka impulzu byla rovna nule, čehož ve skutečnosti nelze dosáhnout, proto se snažíme, aby se tato hodnota nule alespoň blížila.

Vzorkovací periodu a tím i vzorkovací kmitočet nelze zvolit libovolně. Její délka trvání je omezena. Jeho velikost má podstatný vliv na stabilitu diskrétního regulačního obvodu a na další vlastnosti. Velikost vzorkovací periody je odvozena například z amplitudového spektra měřeného signálu. Při špatně zvolené vzorkovací frekvenci by mohlo dojít k antialiasingu, což je překrývání spekter. To znemožní zpětnou rekonstrukci signálu a správnou funkci regulátoru. Tuto problematiku řeší Shannon Kotelníkův teorém, který říká, že vzorkovací kmitočet musí být minimálně dvakrát větší než kmitočet pásma měřeného signálu. [13]

Z-přenos PSD regulátoru:

$$G_R(z) = \frac{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \dots \dots \dots (2)$$

Složka regulátoru	$u(t)$	$u(k)$	$U(z)$
P (P)	$r_0.e(t)$	$r_0.e(k)$	$r_0.E(z)$
S (I)	$r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$	$r_{-1} T \sum_{i=1}^k e(i)$	$r_{-1} T \frac{z}{z-1} E(z)$
D (D)	$r_d \frac{de(t)}{dt}$	$r_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$	$\frac{r_d}{T} \frac{z-1}{z} E(z)$

Tab. 1 Složky diskrétního regulátoru PSD

Akční veličinu $u(k)$ se dá vyjádřit jako součet všech PSD složek regulátoru.

$$d_0 = k_p * \left(1 + \frac{T_0}{T_i} + \frac{T_d}{T_0}\right) \dots \dots \dots (3)$$

$$d_1 = k_p * \left(1 + 2 * \frac{T_d}{T_0}\right) \dots \dots \dots (4)$$

$$d_2 = k_p * \frac{T_d}{T_0} \dots \dots \dots (5)$$

[9]

2 Návrh PSD regulátoru

Nejpoužívanější klasické metody syntézy spojitých regulačních obvodů jsou:

- Metoda standardního tvaru frekvenční charakteristiky otevřeného obvodu.
- Metoda optimálního časového průběhu.
- Metoda optimálního modulu.
- Ziegler-Nicholsova metoda.
- Metoda symetrického optima.
- Metody standardních tvarů charakteristického polynomu.
- MATLAB [9]

Při podrobném studiu dokumentace k modelu vyšlo najevo, že kromě linearizace v pracovním bodě je nutno ještě provádět kompenzaci akční veličiny. Jelikož akční veličina na soustavu není konstantní, ale závisí na aktuální poloze levitující kuličky. Kvůli nelinearitě a nestabilitě soustavy nebudou standardní metody návrhu dávat akceptovatelný výsledek. Návrh regulátoru byl proveden na základě numerických simulací a MATLABU.

MATLAB:

```
clear all; close all; clc;
```

```
Ts=0.04;           %Perioda vzorkovani
Kfv=0.02;          %Odpor kulicky [N/ms]
Ta=3e-3;           %Amplifier and coil time constant [s]
                  %Casova konstanta civky a zesilovace
Kda=5;             %Zesileni DA prevodniku
Kad=0.2;           %Zesileni AD prevodniku

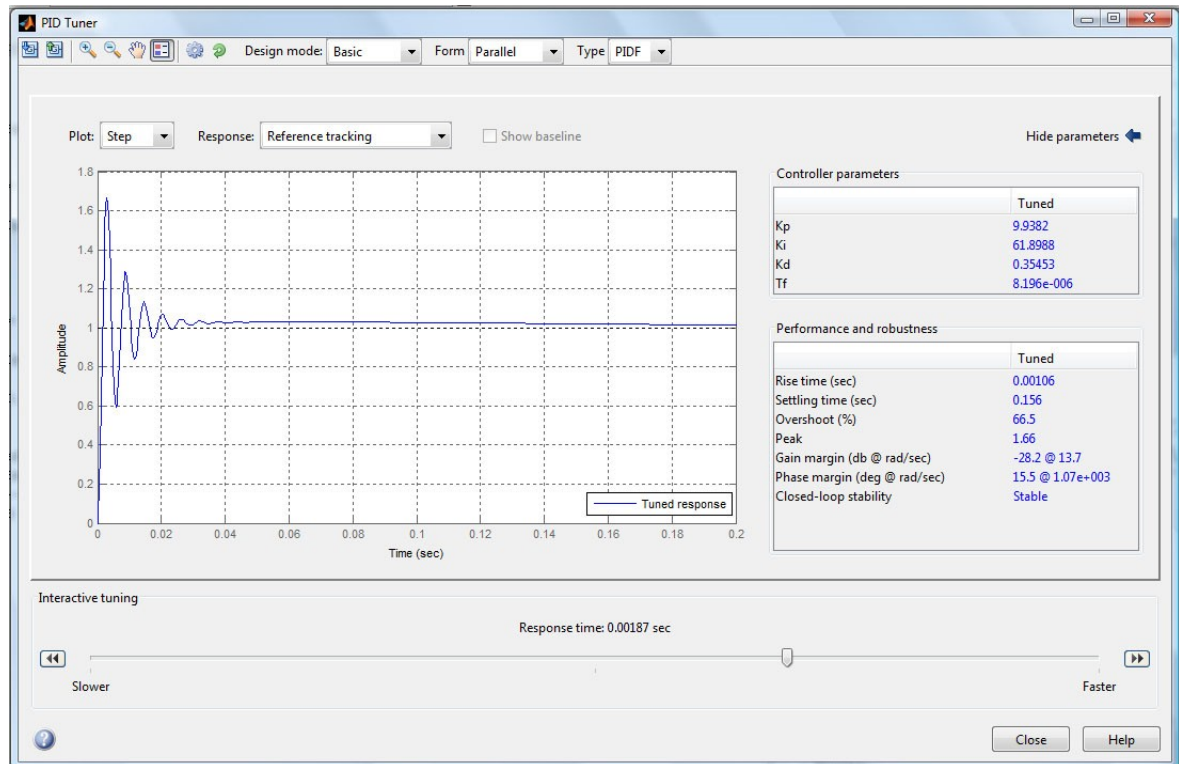
mk=8.37e-3;        %hmotnost kulicky [kg]
kx=1000;           %zesileni senzoru
g=9.81;           %garvitacni zrychleni
ki=0.33;           %Zesileni civky a zesilovace
kf=0.606e-6;       %konstanta civky, [A/V]
                  %kf=0.653e-6;%druha moznost
kc=kf/(ki^2)       %plati tento vzorec
                  %kc=5.9963e-006; %spravna (presna) hodnota
x0=8.26e-3;        %offsetová hodnota [m] - vyska mezi snimacem a civkou
                  %druha moznost x0=9.02e-3;
x00=0.003;         %linearizacni bod (rozsah 0 - 0.0063 [m])
                  %je mozne bud jenom linearizovat pro urcity pracovni bod
                  %nebo potlacit nelianearitu primo ve schematu

%Vypocet napeti rovnovazneho stavu pro dany linearizacni bod
Umu0=sqrt( (mk*g*((x00-x0)^2)) / (kf* (Kda^2)) );
i00=ki*Kda*Umu0;   %dopocteni hodnoty proudu pro dany linerizacni bod .....(6)

%MATICE A,B,C,D
A=[ -1/Ta 0 0; ...
    0 0 1; ...
    (2*i00*kc)/(((x00-x0)^2)*mk) (-2*i00*i00*kc)/(((x00-x0)^3)*mk) -Kfv/mk];
B=[ki*Kda/Ta; 0; 0];
C=[0 kx*Kad 0];
D=[0];              %.....(7)

[num,den]=ss2tf(A,B,C,D)
G=tf(num,den)
pidtool(G)          %.....(8)
```

Pro získání konstant regulátoru byla vyvinuta funkce **pidtool**, která nám přímo vygeneruje konstanty PID regulátoru, ale opět se předpokládá, že známe konkrétní typ regulátoru a víme, za jakou dobu musí být soustava v ustáleném stavu *Obr. 2*.



Obr. 2 - Návrh regulátoru v MATLABu pomocí pidtool

Dobu ustálení si lze jednoduše nastavit pomocí jezdce ve spodní části PID tuneru. Výsledné konstanty se následovně exportují do Workspace v MATLABU, kde se můžou dále zpracovat.

$$k_p + k_i * \frac{1}{s} + k_d * \frac{s}{T_f * s + 1} \dots \dots \dots (9)$$

$$K_p = 9.9382, K_i = 61.8988, K_d = 0.35453,$$

$$T_f = 8.196 * 10^{-6}$$

2.1 PIDf regulátor:

$$9.9382 \left(1 + 6.22837133 * \frac{1}{s} + 0.0356734 * \frac{s}{8.196e-006 * s + 1} \right)$$

$$9.9382 \left(1 + \frac{1}{0.160555616 * s} + 0.0356734 * \frac{s}{8.196e-006 * s + 1} \right)$$

2.2 Přepočet na PSD regulátor

Koeficienty regulátoru d_0 , d_1 , d_2 lze spočítat z periody vzorkování, sumační konstanty, diferenční konstanty a zesilení PSD regulátoru podle vztahů odvozených pomocí Z-obrazu. Výsledkem jsou:

$$T_0 = 0.04$$

$$G_R(z) = \frac{d_0 + d_1 * z^{-1} + d_2 * z^{-2}}{1 - z^{-1}} \dots \dots \dots (26)$$

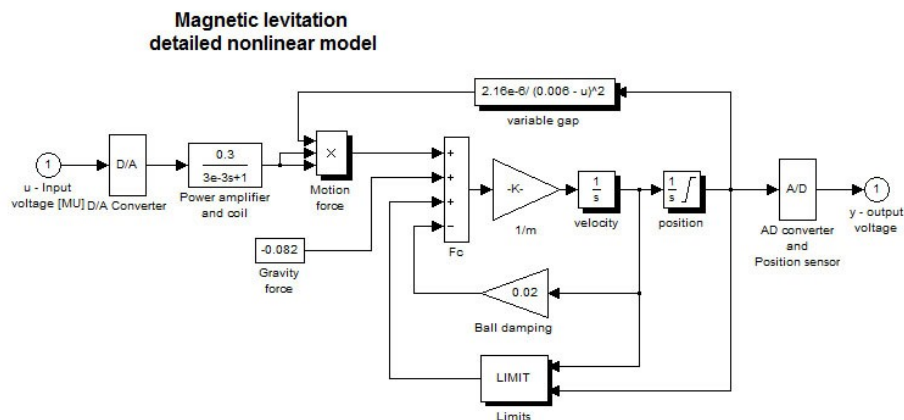
$$d_0 = k_p * \left(1 + \frac{T_0}{T_i} + \frac{T_d}{T_0}\right) = 9.9382 * \left(1 + \frac{0.04}{61.8988} + \frac{0.35453}{0.04}\right) = 98.0357956 \dots \dots \dots (10)$$

$$d_1 = k_p * \left(1 + 2 * \frac{T_d}{T_0}\right) = 9.9382 * \left(1 + 2 * \frac{0.35453}{0.04}\right) = 186.1077023 \dots \dots \dots (11)$$

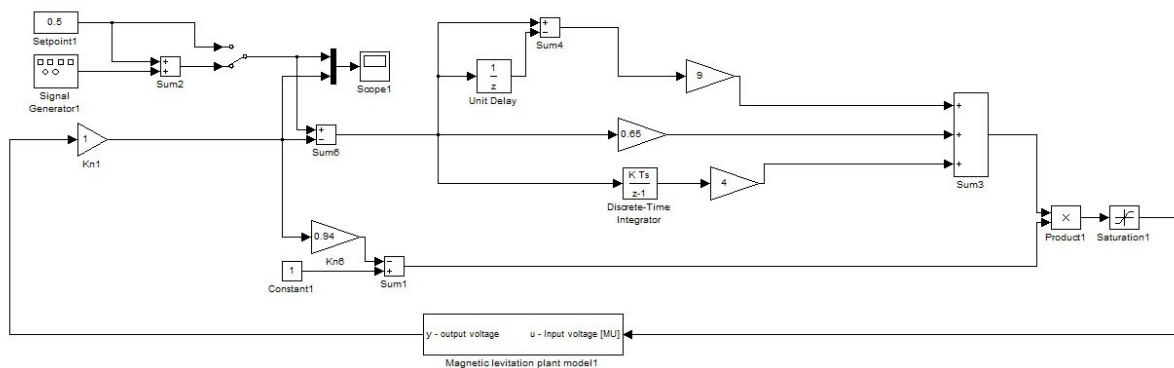
$$d_2 = k_p * \frac{T_d}{T_0} = 9.9382 * \frac{0.35453}{0.04} = 88.08475115 \dots \dots \dots (12)$$

[4]

2.3 Simulace

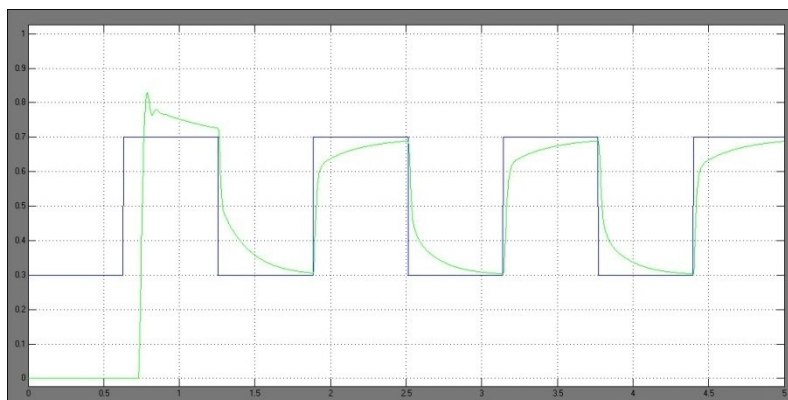


Obr. 3 - Model magnetické levitace v MATLABU

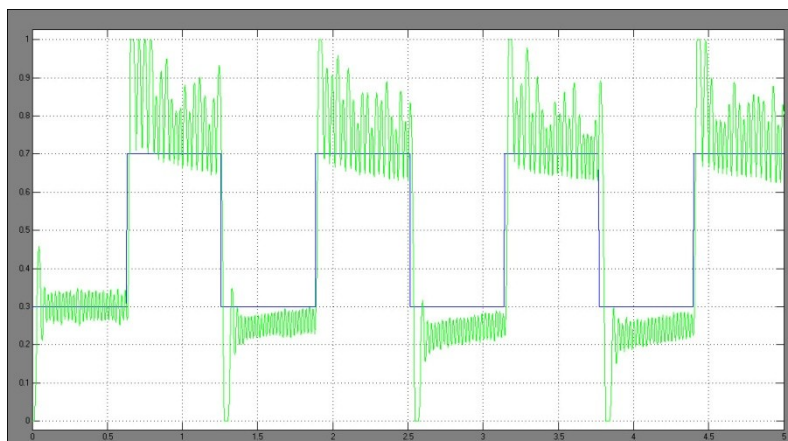


Obr. 4 - Model simulace magnetické levitace

Obr. 3 ukazuje na matematicky vytvořený model magnetické levitace, který je zakomponovaný do modelu magnetické levitace z *Obr. 4*. Simulace má tu výhodu, že pokaždé jak potřebujeme něco odzkoušet, nejsme nuceni být připojeni k soustavě. Tím že pokusy provádíme pouze v simulaci, zbavujeme se rizika zničení soustavy případným špatným nastavením hodnot.



Obr. 5 - Požadovaný a skutečný průběh regulace převzatého regulátoru



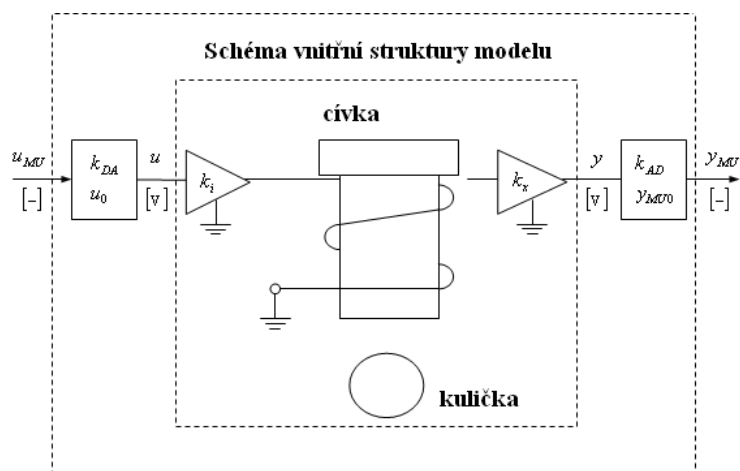
Obr. 6 - Průběh navrženého regulátoru

Obr. 5 je převzatý regulátor, jehož charakteristiky jsou velmi příznivé na rozdíl od naší navrženého regulátoru, jehož průběhy jsou na *Obr. 6*. Je vidět že systém se nedokáže ustálit a neustále kmitá.

3 Popis laboratorního modelu

Fyzikální model se skládá z pěti částí. Na vstupu najdeme D/A převodník, ze kterého jde signál do zesilovače, který přímo-úměrně převede napěťový signál na proudový pro vytvoření

magnetického pole cívky. Pro zpětnou vazbu je do soustavy zabudován senzor polohy a A/D převodník pro výstup z modelu.



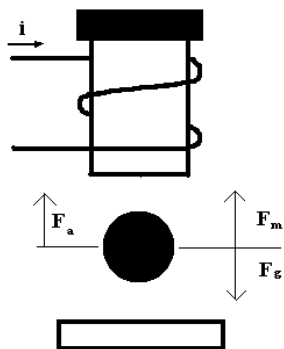
Obr. 7 - Schéma vnitřní struktury modelu

Popis převodníku D/A: $u = k_{DA}u_{MU} + u_0$(13)

Popis zesilovače s cívkou: $\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{k_{am}}{R + k_{am}k_iR_s} \frac{1}{\frac{L}{R + k_{am}k_iR_s}s + 1} = \frac{K_i}{T_a s + 1}$(14)

Zrychlení kuličky závisí na působení magnetické a gravitační síly:

$$F_a = F_m - F_g \text{(15)}$$



Obr. 8 - Znázornění sil působících na řízenou soustavu

Dynamika a zesílení cívky: $\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{k_i}{T_a s + 1}$ (16)

Popis jednotlivých sil působících na kuličku: $F_m = \frac{i^2 k_c}{(x - x_0)^2}$ (17)

$$F_g = m_k g \dots \dots \dots (18)$$

Popis převodníku A/D: $y_{MU} = k_{AD} y + y_{MU0}$ (19)

Vyjádření pohybu kuličky pomocí diferenciálních rovnic:

$$m_k \ddot{x} + k_{fv} \dot{x} = \frac{i^2 k_c}{(x - x_0)^2} - m_k g \quad \text{pro } 0 < x < L \dots \dots \dots (20)$$

Stavový vektor pro linearizaci soustavy 3. řádu: $[i \quad x_1 \quad x_2]^T$

$$i' = -\frac{1}{T_a} + \frac{k_i k_{DA}}{T_a} \cdot u_{MU} \dots \dots \dots (21)$$

$$x_1' = x_2 \dots \dots \dots (22)$$

$$x_2' = \frac{i^2 k_c}{m_k (x - x_0)^2} - g - \frac{k_{fv}}{m_k} x_1' \dots \dots \dots (23)$$

Všeobecně vnitřní popis soustavy:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \dots \dots \dots (24)$$

Potom jednotlivé matice mají tvar:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2 \cdot i_{00}^2 \cdot k_c}{m_k (x_{00} - x_0)^2} & -\frac{2 \cdot i_{00}^2 \cdot k_c}{m_k (x_{00} - x_0)^3} & -\frac{k_{fv}}{m_k} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{k_i k_{DA}}{T_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad k_x k_{AD} \quad 0] \quad D = 0 \dots \dots \dots (25)$$

Ustálená hodnota vstupní akční veličiny:

$$U_{MU0} = \sqrt{\frac{m_k g (x_{00} - x_0)^2}{k_c k_i^2 k_{DA}^2}} \dots \dots \dots (26)$$

Ustálený proud cívky v rovnovážné poloze při dané poloze kuličky:

$$i_{00} = k_i k_{DA} U_{MU0} \dots \dots \dots (27)$$

3.1 Parametry reálného modelu magnetické levitace

$$T_s=0.04$$

$$K_{fv}=0.02 \text{ [N/ms]}$$

$$T_a=3e-3 \text{ [s]}$$

$$K_{da}=5 \text{ [V/MU]}$$

$$K_{ad}=0.2 \text{ [MU/V]}$$

$$m_k=8.37e-3 \text{ [kg]}$$

$$k_x=1000 \text{ [-]}$$

$$g=9.81 \text{ [m/s/s]}$$

$$k_i=0.33 \text{ [A/V]}$$

$$k_f=0.606e-6; \text{ [A/V]}$$

$$k_c=k_f/(k_i^2)$$

$$k_c=5.9963e-006 \text{ [A/V]}$$

$$x_0=8.26e-3 \text{ [m]}$$

$$x_{00} \text{ - linearizační bod (rozsah } 0 - 0.0063 \text{ [m])}$$

$$D_K=12.7e-3 \text{ [m]}$$

$$L_0=19e-3 \text{ [m]}$$

$$L = L_0 - D_K = 6.3e-3 \text{ [m]}$$

Po dosazení těchto hodnot do jednotlivých proměnných matic A,B,C,D vnitřního popisu získáme:

$$A =$$

$$\begin{bmatrix} -0.33330e+003 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00100e+003 \\ 0.01960e+003 & 2.37530e+003 & -0.00240e+003 \end{bmatrix}$$

$$B =$$

$$\begin{bmatrix} 550 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

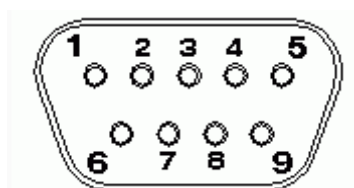
$$C = \begin{bmatrix} 0 & 200 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

$$\dots\dots\dots(28)$$

$$[3]$$

3.2 Kabelové propojení soustavy s PLC



Obr.9 - Kabelové propojení soustavy

Na Obr. 9 je konektor cannon9, který je použit pro propojení soustavy s kontrolérem. Pin 3 je využit jako zpětná vazba vedený červeným vodičem (OUT1). Další využitý pin je pin číslo 5 pro vstup akční veličiny do soustavy propojen zeleným vodičem (IN). Piny 6 až 9 jsou spojeny a využity jako zemnění (GND).

4 Programovatelný automat WinPAC – 8000



Obr. 10 - Programovatelný automat WinPAC-8000

WinPAC – 8000 je druhá generace PAC (Programmable Automation Controller) firmy ICPDAS. Vyznačuje se spolehlivostí a flexibilitou s různými programovacími jazyky jako například: C++, C#, Rex, Basic, SCADA systémy, různé programovací jazyky pro PLC atd. Má malou velikost jádra, rychlé zpracování přerušení na hlubší úrovni, malé náklady.

Procesor	PXA270 CPU (32-bit & 520MHz)
Operační paměť	Windows CE 5.0
SDRAM	128 MB
Flash paměť	96 MB
EEPROM	16 kB
Paměťová karta	microSD patice pro kartu s max. velikostí 1 GB

RTC (hodiny reálného času)	Od roku 1980 do 2079
Dual Watchdog Timers	Ano
VGA port	Podporované rozlišení: 800x600, 640x480
2x Ethernetový port	RJ-45, 10/100 Base-TX
USB 1.1 (host)	Klávesnice nebo myš
COM port	2x RS232, 2x RS485
Provozní teplota	-25 ~ +75 °C
Skladovací teplota	-30 ~ +85 °C
Provozní vlhkost vzduchu	5 ~ 90%
Napájení	+10 ~ +30VDC
Rozměry (Š x V x H) (mm)	355 x 132 x 111

Tab. 2. Základní technické parametry WinPAC WP - 8841

4.1 Použité moduly

Pro regulaci byly použity dva paralelní moduly a to I-8024W a I-8017HW. Jeden pro řízení soustavy a druhý pro zpětnou vazbu (snímač).

4.1.1 I-8017HW analogové vstupy

Modul obsahuje 8 diferenciálních nebo 16 single-ended kanálů analogových vstupů. Každý kanál může pracovat v jednom z následujících pěti režimů:

1. $\pm 10\text{ V}$ vlajka typu *X* (extra large)
2. $\pm 5\text{ V}$ vlajka typu *L* (large)
3. $\pm 2.5\text{ V}$ vlajka typu *M* (medium)
4. $\pm 1.25\text{ V}$ vlajka typu *S* (small)
5. $\pm 20\text{ mA}$ vlajka typu *C* (current)

Tento modul je použit pro zpětnou vazbu soustavy. Je použita vlajka 8 kanálového analogového vstupu s popisem: (WPC__S5I17X0-7). Čidlo je zapojeno do vstupu Vin0+, na svorkovnici modulu je to třetí pin.

41.2 I-8024W analogový výstup

Modul obsahuje 4 kanály analogových výstupů. Každý kanál lze použít jako proudový (I0 - I3) nebo napěťový (V0 - V3). Na vlajky proudových výstupů lze posílat hodnoty v intervalu $\pm 20 \text{ mA}$ na vlajky napěťových výstupů v rozsahu $\pm 10 \text{ V}$. Tento modul je použit pro akční zásah. Vlajky jsou typu I (proudové) nebo V (napěťové). Je použita vlajka 4 kanálového výstupu s popisem (WPC__S4I24V0-3). Soustava je připojena do výstupu V0out, na svorkovnici modulu 11 pin. Celá soustava je spojena se zemí pomocí Agnd na svorkovnici modulu 12 pin.

4.2 Prostředí řídicího systému REX

Systém Rex je kompatibilní se systémem MATLAB Simulink, z tohoto důvodu lze v Rex Draw stejným způsobem skládat funkční bloky a vytvářet řídicí algoritmy. Simulink i RexDraw ukládá své soubory ve formátu mdl (model). Tyto soubory jsou ale příliš rozsáhlé a některé paměti systému by nedokázaly pojmout takové množství dat, proto se pomocí RexComp (překladače) data překládají do binární formy rex.

Oproti Simulinku musí být vytvořeny nejméně dva soubory a to jeden hlavní, který specifikuje konfiguraci jednotlivých subsystémů řídicího systému. Nejčastěji hlavní soubor specifikuje blok EXEC. Další soubory jsou brány jako řídicí soubory úlohy.[1]

4.3 Použité funkční bloky

GAIN



Blok GAIN násobí analogový vstup s reálnou konstantou k .

Vstup = u

Výstup = y

Parametr = k

$y = k * u$

CNR



Blok CNR slouží pro zadání reálné konstanty

Výstup = y

Parametr = PCN – konstantní hodnota výstupu

SG



Bloky SG může generovat podle zvoleného typu signálu *isig* periodické funkce: sinus, obdélník (se střídou 1), pilovitý signál a bílý šum s rovnoměrným rozdělením. Amplitudu a frekvenci výstupního signálu y určují po řadě parametr *amp* a *freq*. Výstup y v případech $isig \in \{1, 2, 3\}$ může být navíc fázově posunut podle parametru $phase \in (0, 2\pi)$.

Výstup = y generovaný signál

Parametry =

1: *SINE* - sinusový signál

2: *SQUARE* - obdélníkový signál se střídou 1

3: *SAWTOOTH* - pilovitý signál

4: *RANDOM* - bílý šum s rovnoměrným rozdělením

amp - amplituda generovaného signálu double

freq - frekvence generovaného signálu double

phase - fázové posunutí generovaného signálu double

ifrmitt - určuje jednotky, ve kterých je zadána frekvence

1 ... *Hz*

2 ... *rad*

iphunit určuje jednotky, ve kterých je zadáno fázové posunutí

1 ... *stupně*

2 ... *rad*

ADD



Blok ADD sčítá dva vstupní analogové signály $y = u1 + u2$.

Vstupy = $u1$, $u2$ – první a druhý vstup

Výstup = y výstup, součet prvního a druhého vstupu ($u1 + u2$)

SUB

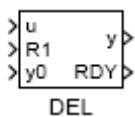


Blok SUB odčítá dva vstupní analogové signály $y = u1 - u2$.

Vstupy = $u1$, $u2$ – první a druhý vstup

Výstup = y výstup, rozdíl prvního a druhého vstupu ($u1 - u2$)

DEL



Blok DEL realizuje zpoždění vstupního signálu u o n vzorků

$$yk = uk - n.$$

Vstupy =

u - vstupní signál

$R1$ - puls ($0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$) na vstupu $R1$ způsobí restart bloku s inicializací prvních n výstupních vzorků y na výstupu $y0$

$y0$ - inicializační hodnota

Výstupy =

y - zpožděný signál

RDY - příznak, že paměťový buffer je již naplněn vstupními vzorky

Parametry =

n - zpoždění ve vzorcích (příslušné časové zpoždění je nTs , kde Ts je perioda spouštění bloku)

MUL



Blok MUL násobí dva vstupní analogové signály $y = u1 * u2$.

Vstupy = $u1$, $u2$ – první a druhý vstup

Výstup = y výstup, součin prvního a druhého vstupu ($u1 * u2$)

SAT



Blok SAT kopíruje vstup u do výstupu y , pokud je vstupní veličina v intervalu $hlim$, $hilim$, kde $lolim$ a $hilim$ jsou stavové proměnné bloku. Je-li $u < lolim$ ($u > hilim$), potom $y = lolim$ ($y = hilim$). Horní a dolní limit jsou buď pevné hodnoty, dané po řadě parametry bloku $hilim0$ a $lolim0$ (případ $HLD=1$) nebo jsou řízeny vstupy hi a lo ($HLD=0$). Maximální rychlost změny aktivních mezí $hilim$ a $lolim$ je dána časovými konstantami tp a tn . Parametr tp určuje maximální kladnou strmost a tn maximální zápornou strmost změny $hilim$ a $lolim$. Výstupy HL a LL signalizují po řadě horní a dolní saturaci

Vstupy =

u – vstup

hi - horní mez pro případ $HLD=0$

lo - dolní mez pro případ $HLD=0$

Výstupy =

y – výstup

HL - příznak saturace na horní mezi

LL - příznak saturace na dolní mezi

Parametry=

$hilim0$ - počáteční hodnota horní meze pro případ $HLD=0$ a aktivní horní mez pro případ $HLD=1$

$lolim0$ - počáteční hodnota dolní meze pro případ $HLD=0$ a aktivní dolní mez pro případ $HLD=1$

tp - časová konstanta rychlosti změny aktivní hodnoty horní meze pro

případ $HLD=0$

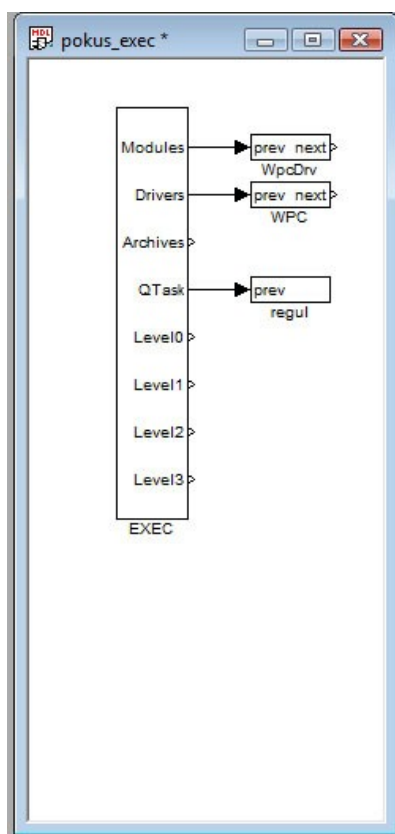
t_n - časová konstanta rychlosti změny aktivní hodnoty dolní meze pro

případ $HLD=0$

HLD - režim činnosti: ($HLD=0 \dots$ proměnné meze; $HLD=1 \dots$ pevné meze)

[2]

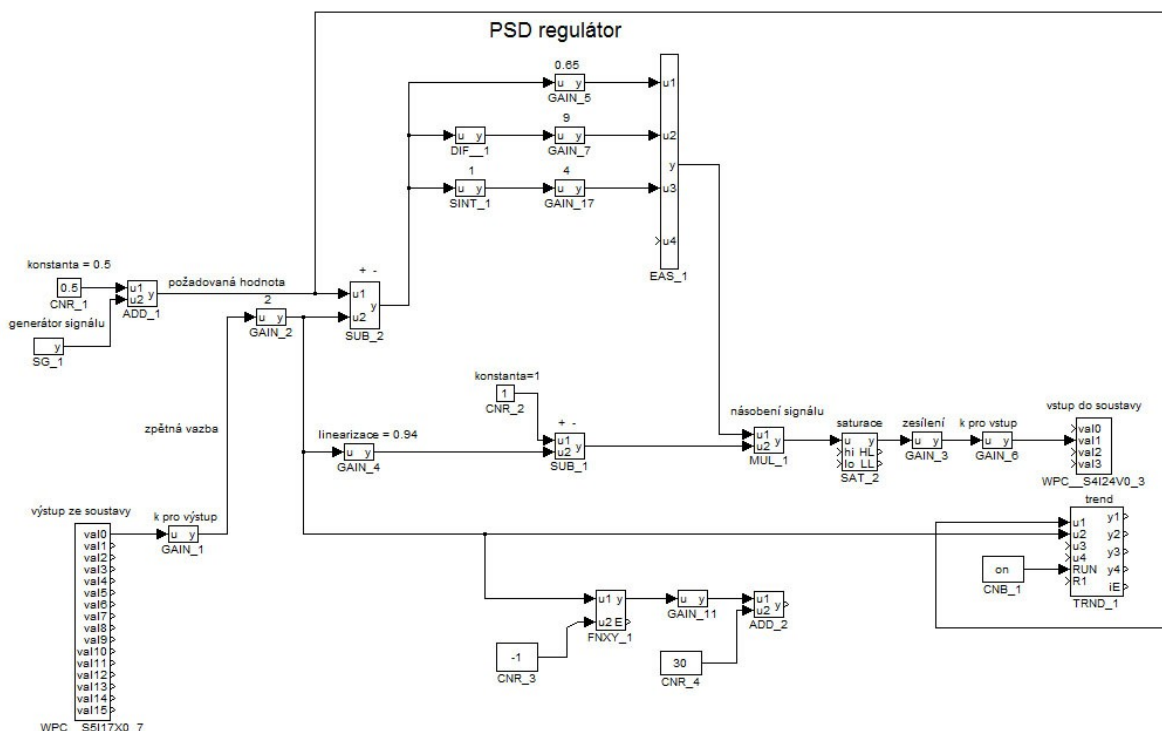
5 Realizace PID regulátoru na soustavě magnetické levitace v systému REX



Obr. 11 - Hlavní soubor

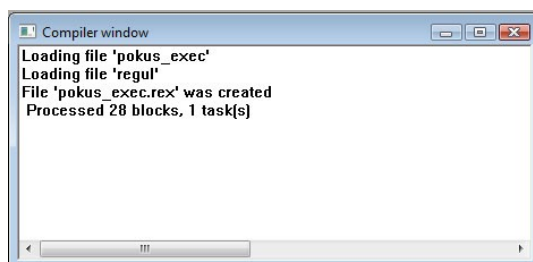
Blok EXEC tvoří základ tzv. hlavního souboru projektu ve formátu mdl, kterým se konfiguruji jednotlivé subsystémy řídicího systému REX, a který nemá analogii v systému Matlab-Simulink. Konfigurace bloku EXEC a na něj navázané bloky jsou zpracovány překladačem RexComp. Moduly WpcDrv a WPC slouží jako ovladače k modulům. V bloku *regul* připojeném k hlavnímu oknu EXEC je vytvořený regulační algoritmus. [2]

5.1 Navržený PSD regulátor



Obr. 12 - Regulátor v RexDraw

Navržený regulátor na Obr 12. se skládá z několika částí. První část je zadání amplitudy a tvaru signálu. Signál pokračuje do rozdílového členu, kde se odečte skutečná hodnota od požadované, výsledkem je odchylka, která vstupuje do PSD regulátoru tvořeného proporcionální, integrační a derivační složkou. Akční veličina se násobí s částí sloužící k linearizaci soustavy. Akční veličina nakonec prochází blokem saturace, která hlídá akční veličinu v určitých mezích. Akční veličina musí být nakonec zesílena, aby hodnota akční veličiny odpovídala požadovanému napětí. Na zpětné vazbě je připojeno několik bloků, které slouží k přepočtu souřadnice polohy kuličky k vizualizaci. Tato část programu převrací hodnotu ze zpětné vazby, zesílí se a přičítá se k hodnotě, která ve vizualizaci ukazuje nulovou hodnotu levitující kuličky.

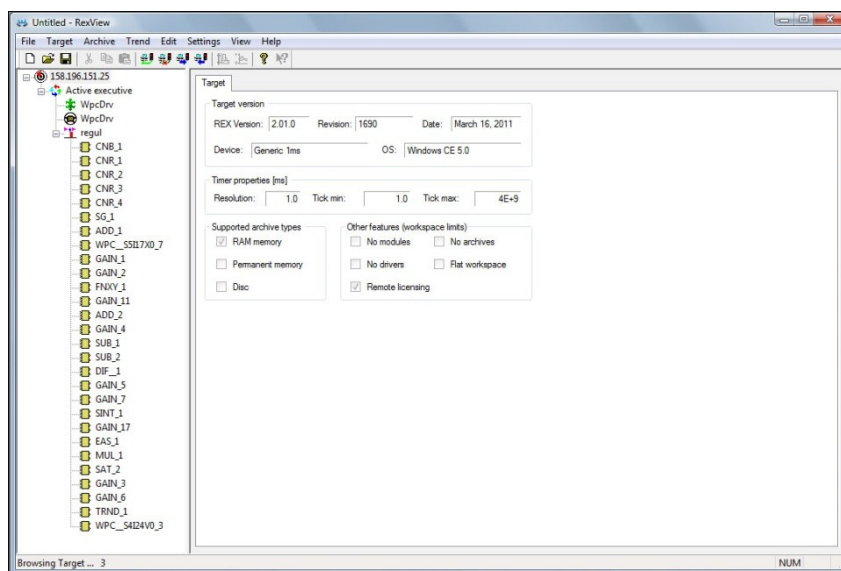


Obr. 13 - Kompilace programu

Na základě hlavního souboru projektu aplikace ve formátu mdl generuje program Rex- Comp binární konfigurační soubor řídicího systému REX. Při svém spuštění vypisuje překladač informace o překládaných souborech a případně i výskyt chyb překladu. Pokud je detekována závažná chyba, končí se překlad konfigurace a nevytvoří se výsledný binární soubor. Překladač je možné spouštět přímo z konfiguračního programu RexDraw v menu Compiler/Compile.[10]

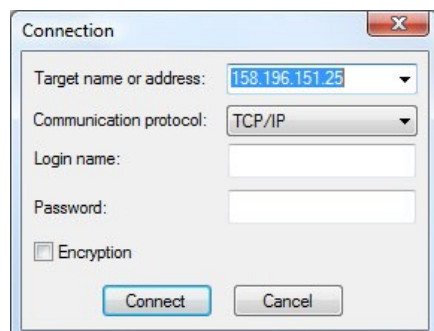
5.2 RexView

Program RexView umožňuje sledovat, co se děje v jádru řídicího systému REX při jeho běhu, a proto je velmi důležitým nástrojem při uvádění řídicího systému do provozu i v případě vzniku nějakých problémů během rutinního provozu. Program poskytuje detailní hierarchicky uspořádané informace o subsystémech jádra. Komunikace pomocí protokolu TCP/IP umožňuje připojit se k běžícímu jádru na lokálním počítači, v lokální síti i ve vzdálené síti (například přes Internet).[10]



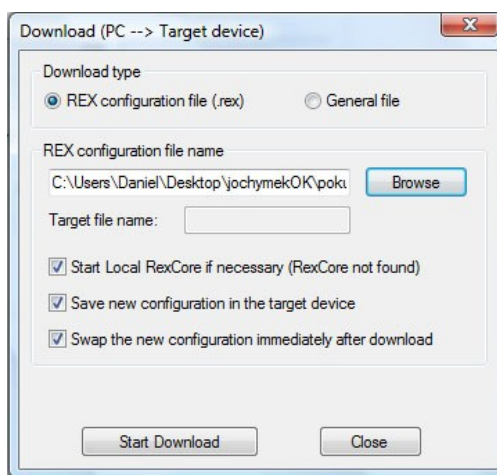
Obr. 14 - RexView

RexView je diagnostické prostředí. Při spuštění programu lze zjistit chování všech součástí. Z Obr. 14 lze vyčíst, k jakému kontroléru bylo zařízení připojeno, systém pod kterým funguje a další údaje.



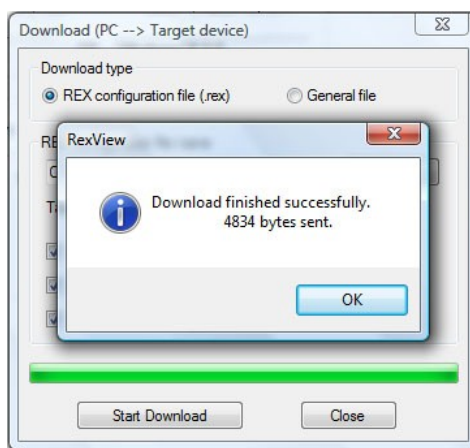
Obr. 15 - Přihlášení k PLC

Při nahrávání souboru musíme vědět IP adresu kontroléru, která se запиše do tabulky, která se sama nabídne *Obr15*.



Obr. 16 - vybrání souboru pro regulaci

Po přihlášení přichází zadání cesty k souboru, která se vybere pomocí tlačítka Browse a tlačítkem Start Download se program nahraje do kontroléru *Obr16*.



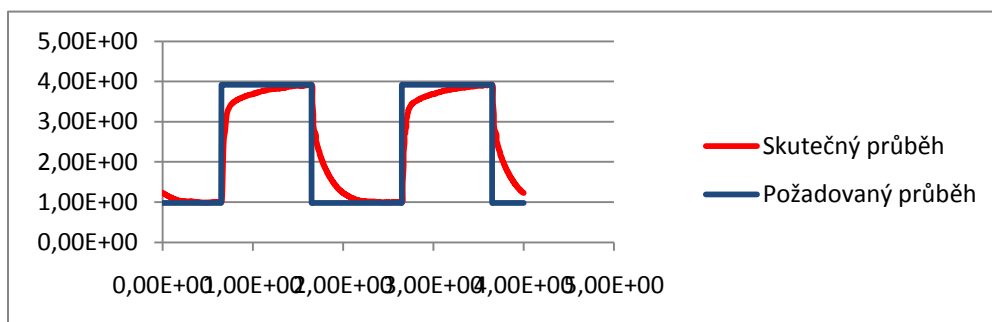
Obr. 17 - úspěšné nahrání programu do PLC

Po úspěšném nakopírování souboru do PLC se objeví potvrzovací tabulka, která nás ujistí o správné komunikaci a kompletním nahrání programu *Obr17*. Po spuštění programu máme přístup ke všem blokům programu. Můžeme vidět a měnit hodnoty bloků. V bloku TREND si můžeme zobrazit průběhy a také zobrazuje naměřené hodnoty přivedené do bloku *Obr18*.

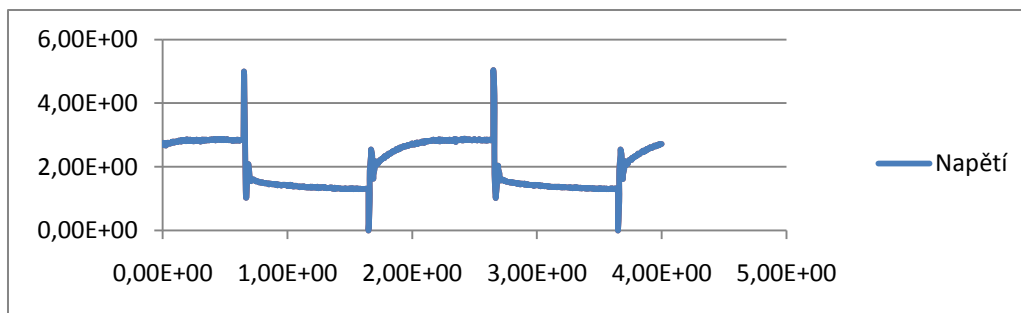
Trend						
Variables: <input checked="" type="checkbox"/> Inputs <input checked="" type="checkbox"/> Outputs <input checked="" type="checkbox"/> Parameters						
Na...	Value	Quality	Connection	Type	Minimum	Maximum
*u1	2,00000000E-001	GOOD	ADD_1:y	dou...		
*u2	-2,68554688E-003	GOOD	GAIN_2:y	dou...		
*u3	0,00000000E+000	GOOD		dou...		
*u4	0,00000000E+000	GOOD		dou...		
*R...	on	GOOD	CNB_1:y	bool		
*R1	off	GOOD		bool		
*y1	2,00000000E-001	GOOD		dou...		
*y2	-2,68554688E-003	GOOD		dou...		
*y3	0,00000000E+000	GOOD		dou...		
*y4	0,00000000E+000	GOOD		dou...		
*iE	0	GOOD		long		
*n	2	GOOD		long	1	4
*l	10000	GOOD		long	0	268435455
*b... 8: Double	...	GOOD		long	1: Bool	9: Time
*p... 1: Store	...	GOOD		long	1: Store	7: Variance
*p... 1: Store	...	GOOD		long	1: Store	7: Variance
*p... 1: Store	...	GOOD		long	1: Store	7: Variance
*p... 1: Store	...	GOOD		long	1: Store	7: Variance
*p...	1	GOOD		long	1	1000000
*a...	0	GOOD		long	0	1000000
*arc		GOOD		word		
*id	1	GOOD		word		
*T...	Trend Title	GOOD		string		

Obr. 18 - RexTREND

V trendu lze exportovat hodnoty k dalšímu zpracování například v MATLABu nebo Microsoft Office Excel. Na *Obr. 19* je takto vytvořeny graf požadované a skutečné veličiny, *Obr. 20* zobrazuje akční veličinu působící na soustavu. Takto lze jednoduše porovnávat akční veličinu vůči skutečné a požadované veličině.



Obr.19 - Zobrazení průběhu regulace



Obr20. - Průběh napětí působící na soustavu

Na Obr. 20 vidíme napětí vstupující do soustavy neboli akční veličinu. Model je sice řízen proudově, ale jako akční veličinu používáme napětí, které je díky zabudovaným operačním zesilovačům převedeno na proud přímo úměrou.

6 Vizualizace

6.1 PROMOTIC

je komplexní SCADA objektový softwarový nástroj pro tvorbu aplikací, které monitorují, řídí a zobrazují technologické procesy v nejrůznějších oblastech průmyslu. Dá se s ním pracovat ve většině operačních systémech vyvinutých společností Microsoft: Windows 7/Vista/XP/2000/XPe/2003-8Server a novějších. Umožňuje efektivně vytvářet distribuované a otevřené aplikace v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Dovoluje vytvářet aplikace přesně podle požadavků. Poskytuje příjemné uživatelské rozhraní pro tvorbu aplikací.

6.2 PROMOTIC - historie

První verze vizualizačního a řídicího systému PROMOTIC vznikla v roce 1991 v podobě PROMOTIC TM pro MS-DOS, která byla úspěšně nasazena ve stovkách aplikací v průmyslu (hutě, chemický průmysl, doly, potravinářský průmysl, energetika, ekologie a další).

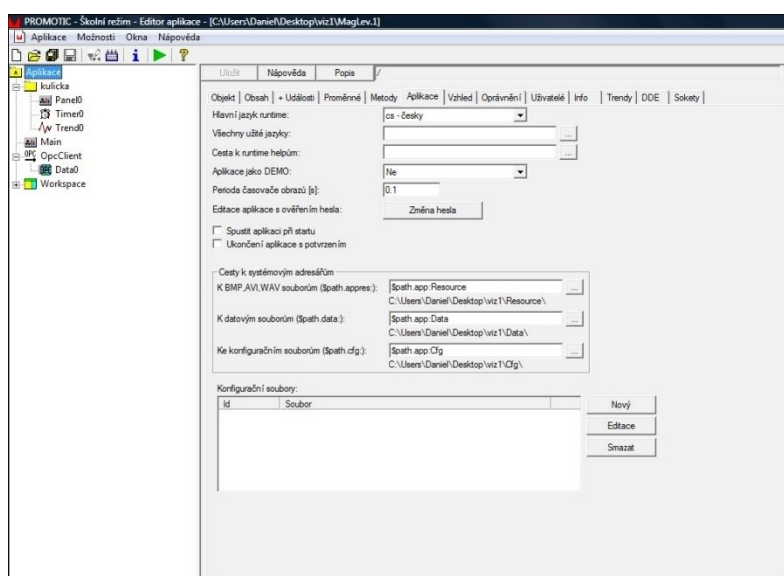
V roce 1994 firma zahájila vývoj verze PROMOTIC pro 32-bitová Windows.

Historie verzí:

- PROMOTIC verze 4 (od roku 1996)
- PROMOTIC verze 2000 (od roku 2000)
- PROMOTIC verze 6 (od roku 2002)
- PROMOTIC verze 7 (od roku 2006)
- PROMOTIC verze 8 (od roku 2009)


6.3 Editor obrazů


slouží k vytváření grafických obrazů aplikace, skupin libovolného počtu grafických prvků, kterou vytvoří projektant podle svých představ výběrem z palety předdefinovaných prvků *Obr. 21*. V těchto prvcích lze zadávat jejich statické vlastnosti, popř. tyto vlastnosti napojit datovou vazbou a oživit tak vytvářenou vizualizaci. Napojit datovou vazbou lze všechny důležité vlastnosti grafických prvků: barva, poloha, velikost, hodnota a mnoho dalších. Podpora tvorby vlastních složených grafických prvků a import/export do XML (do textových dat) přináší úsporu práce projektanta a rychlou tvorbu aplikace. Uživatel může vytvářet obrazy, které jsou standardními Windows okny nebo může definovat okna s pevnou pozicí, pevnou velikostí, okna aplikace přes celou obrazovku, bez okenních lišt a definovat maximální počet současně otevřených oken.




Obr. 21 - Editor aplikace

6.4 Menu a nástrojová lišta editoru aplikace


Nová aplikace:  Otevře dialogové okno pro vytvoření a umístění nového projektu aplikace na disku

Otevření aplikace:  Otevře dialogové okno pro vyhledání existujícího projektu aplikace na disku


Uložení aplikace:  Uložení aplikace s vytvořením zálohy

Uložení objektu:  (Ctrl+U) Uložení právě editovaného objektu

Editace obrazů:  Otevře okno editoru obrazů

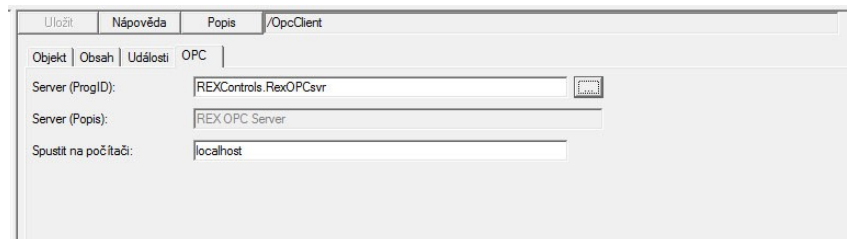
Spuštění aplikace:  (Ctrl+B) Spuštění aplikace

Informační systém:  (Ctrl+I) Otevře okno INFO systému PROMOTIC

Nápověda:  (F1) Otevře PROMOTIC dokumentaci v části, která souvisí s právě prováděnou činností.

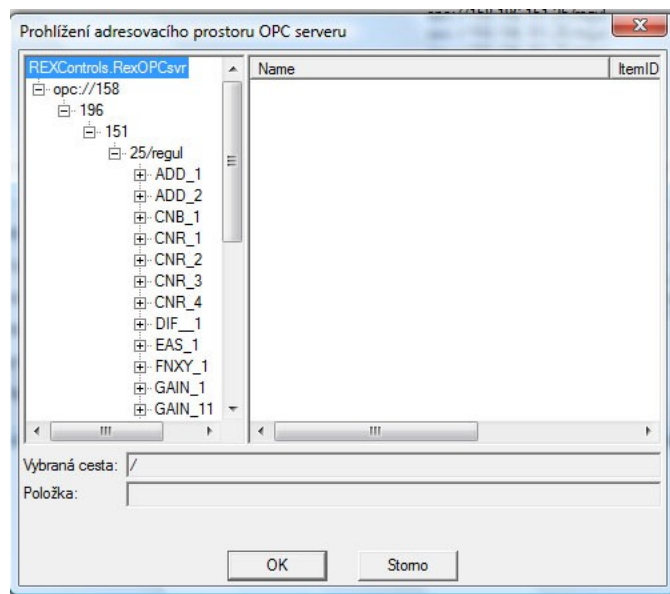
Grafická část vizualizace je vytvořena ve složce kulička. Ve složce se nachází Panel0, který má ve svém obraze schovanou uživatelskou část vizualizace. Timer0 důležitý kvůli trendům, je časovač který obsluhuje pouze tu část kterou má v sobě zapsanou (pMe.Pm("../Trend0").Run), v závorce je vidět že bude obsluhovat pouze Trend0. V záložce Trend0 jsou zapsány adresy komponent, které chceme zobrazovat. Všechny hodnoty musí být přidány pomocí OPC. Jak provést tuto operaci, se dozvíme níže.

6.5 OPC Server- Zadávání proměnných



Obr. 22 - Zadání adresy OPC server

Při špatném zadání OPC serveru se nezobrazí funkční bloky soustavy jako na Obr. 23 a proto nedokážeme navázat žádnou proměnnou. Adresa OPC se musí nastavit v kořenovém adresáři REXu ve složce RexOPC. Pokud je tato část správně nastavena, OPC server se nám nabídne sám Obr. 22. Jestli je serverů nastaveno více, musíme si vybrat, který chceme pro danou část realizace využívat.



Obr. 23 - Prohlížení adresového prostoru OPC serveru

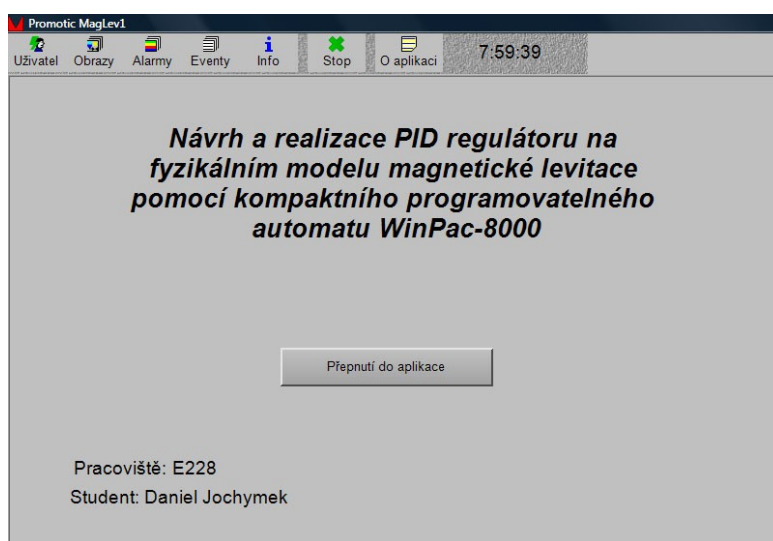
Po přihlášení k OPC si v záložce data můžeme přidávat proměnné Obr. 23, na které se později v grafické části vizualizace budeme odkazovat s text-boxy a dalšími komponentami. Z každého bloku si můžeme vybrat, kterou hodnotu chceme využívat. U většiny bloků si můžeme vybrat vstupní nebo

výstupní hodnotu. Dále záleží, jaké komponenty nám blok nabídne například konstantu a další možnosti nastavení.

Index	Jméno	Dat. typ	Hodnota	Poznámka	ItemId
0	konstanta_po...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
1	generator_sig...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
2	generator_sig...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
3	generator_sig...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
4	vystup_z_ojda	Double			opc://158.196.151.25/regul.
5	kulicka	Double			opc://158.196.151.25/regul.
6	vstup_do_so...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
7	skutecná_ho...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
8	pozadovana_...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
9	regulator_sloz...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
10	regulator_sloz...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
11	regulator_sloz...	Double			opc://158.196.151.25/regul.
12	G_11	Double			opc://158.196.151.25/regul.
13	cmr_4	Double			opc://158.196.151.25/regul.
14	napieti_do_so...	Double			opc://158.196.151.25/regul.

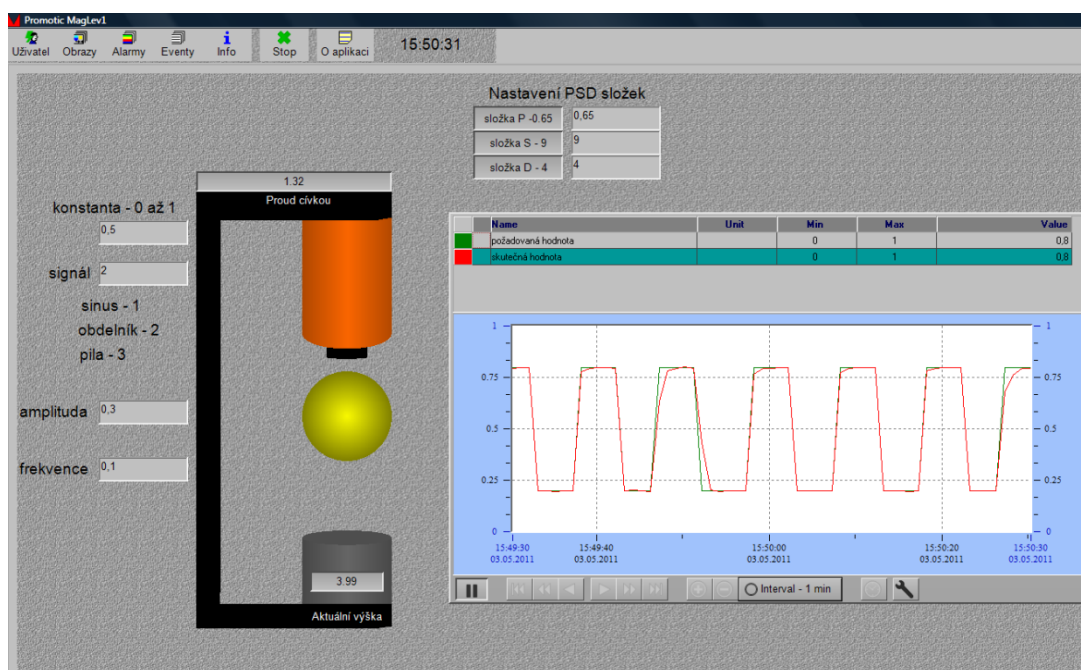
Obr. 24 - Vybrané proměnné v OPC pro vizualizace

Na Obr. 24 jsou vybrané proměnné OPC. Hodnoty navazují na program regulace. Je třeba pečlivě rozvažovat, které hodnoty nám budou k užítku a které nikoliv, velmi důležité je vybrat si správný datový typ proměnné. Proměnné se dají dále upravovat například matematickými operacemi. Jedna adresa může být ve vizualizaci použita několikrát. Adresy se dále dají přejímat nebo naopak vkládat do jiných vizualizací s použitím stejného řídicího programu s podmínkou použití kontroléru se stejnou adresou.



Obr. 25 Úvodní stránka vizualizace

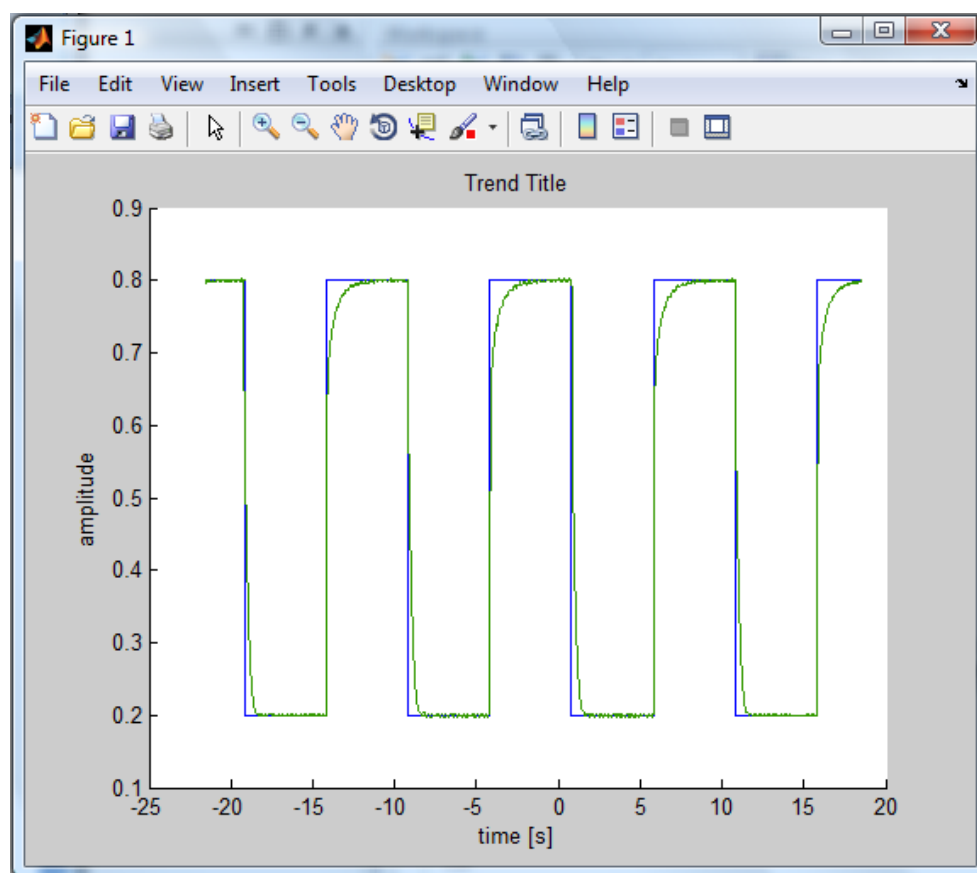
V úvodní stránce *Obr. 25* je popsán řešený problém, pracoviště, na kterém byla problematika řešena. Také je možnost se do aplikace přihlásit jako host nebo administrátor. Tlačítkem “Přepnutí do aplikace” se dostaneme do hlavní stránky vizualizace *Obr.26*.



Obr. 26 - Hlavní stránka vizualizace

Hlavní stránka vizualizace *Obr. 26* umožňuje ovládat celou soustavu i ze vzdáleného místa a přitom vidět, jak se soustava chová. Složkou konstanta udáváme nulovou hodnotu kuličky, to znamená, když je hodnota 0.5 a signál 0 zůstane kulička viset cca uprostřed mezi magnetem a cívkou. Můžeme použít 4 druhy signálu jako je: sinus, obdelník, pila a náhodný signál. Vzhledem k tomu, že model magnetické levitace nedokáže tak rychle reagovat na změnu signálu, je používání náhodného signálu irelevantní. Další nastavitelné hodnoty jsou amplituda a frekvence. Amplitudou udáváme, jak velký bude rozptyl od nulové hodnoty (cca 3 cm od čidla při konstantě 0.5) a frekvence se stará o rychlost kmitání kuličky v magnetickém poli. Tato hodnota je v Hz.

Je dovoleno měnit i složky PSD regulátoru, což se nedoporučuje, ale díky této funkci dokážeme sledovat chování soustavy při drobných změnách složek.



Obr. 27 - Průběh požadované a skutečné veličiny z exportovaných dat Java Rex trendu

Program Java trend je velmi užitečný nástroj pro sledování průběhů regulace. Dá se použít i ze vzdálených míst připojením k internetu. Jde ho použít i pro dlouhodobé sledování. Data regulace lze použít pro další zpracování, například v MATLABU, jak je vidět na Obr. 27.

Závěr

Všechny body v zadání bakalářské práce byly splněny. Prvním bodem bylo studium základních metod syntézy zpětnovazebních regulačních obvodů. Malá část znalostí byla přenesena do kapitoly spojité a diskrétní řízení, v níž jsou popsány základní rozdíly těchto regulátorů. Regulace magnetické levitace je vytvořena pro diskrétní regulátor, jelikož ale diskrétní regulátor je založen na principu spojitěho řízení, bylo nutností nejdříve stručně popsat tuto problematiku.

Dalším bodem bylo se seznámit s matematickým a fyzikálním modelem a linearizací v pracovním bodě. Vycházel jsem z dokumentace vytvořené firmou Humusoft pro daný model. Model byl navrhnut pro měřicí kartu téže firmy, proto bylo nutností pečlivě prostudovat všechny části modelu, aby nedošlo ke zbytečným chybám a případnému zničení modelu. Linearizace v pracovním bodě byla provedena ve výšce cca 3cm. Soustava je ale velice nelineární a nestabilní což se projevilo v dalším bodě.

Návrh PID regulátoru a simulace regulačního obvodu v prostředí REX + simulink - při realizaci této části se ukázaly změny ve funkčních blocích prostředí REX a simulink, některé bloky se stejným názvem mají jiný matematický popis, což prodloužilo vývoj aplikace. Návrh byl proveden pomocí MATLABU. Výsledky návrhů nebyly uspokojivé, jelikož soustava byla neustále mírně rozkmitaná a nikdy se nedostala do ustáleného stavu, proto byl použit regulátor doladěný v simulaci pomocí testování.

Realizace navrženého algoritmu na programovatelném automatu WinPAC-8000 s využitím řídicího systému REX byla úspěšná. Převzatý regulátor funguje podle teoretického předpokladu, i když na něm jsou vytvořené úpravy, kvůli nelinearitě a nestabilitě soustavy.

Vizualizace ve vybraném vizualizačním prostředí SCADA/HMI - ve vybraném vizualizačním prostředí PROMOTIC bylo vytvořeno graficko-uživatelské rozhraní, ve kterém lze pozorovat aktuální pozici levitující kuličky, odečítat naměřené hodnoty proudu protékající cívkou a vzdálenost kuličky od indukčního senzoru. Dále uživatel v této aplikaci volí signál průběhu levitace, frekvenci jednotlivých signálů a amplitudu. Pro zobrazení průběhu levitace je v GUI umístěn trend, který zobrazuje požadovanou a skutečnou hodnotu výšky.

Použitá literatura

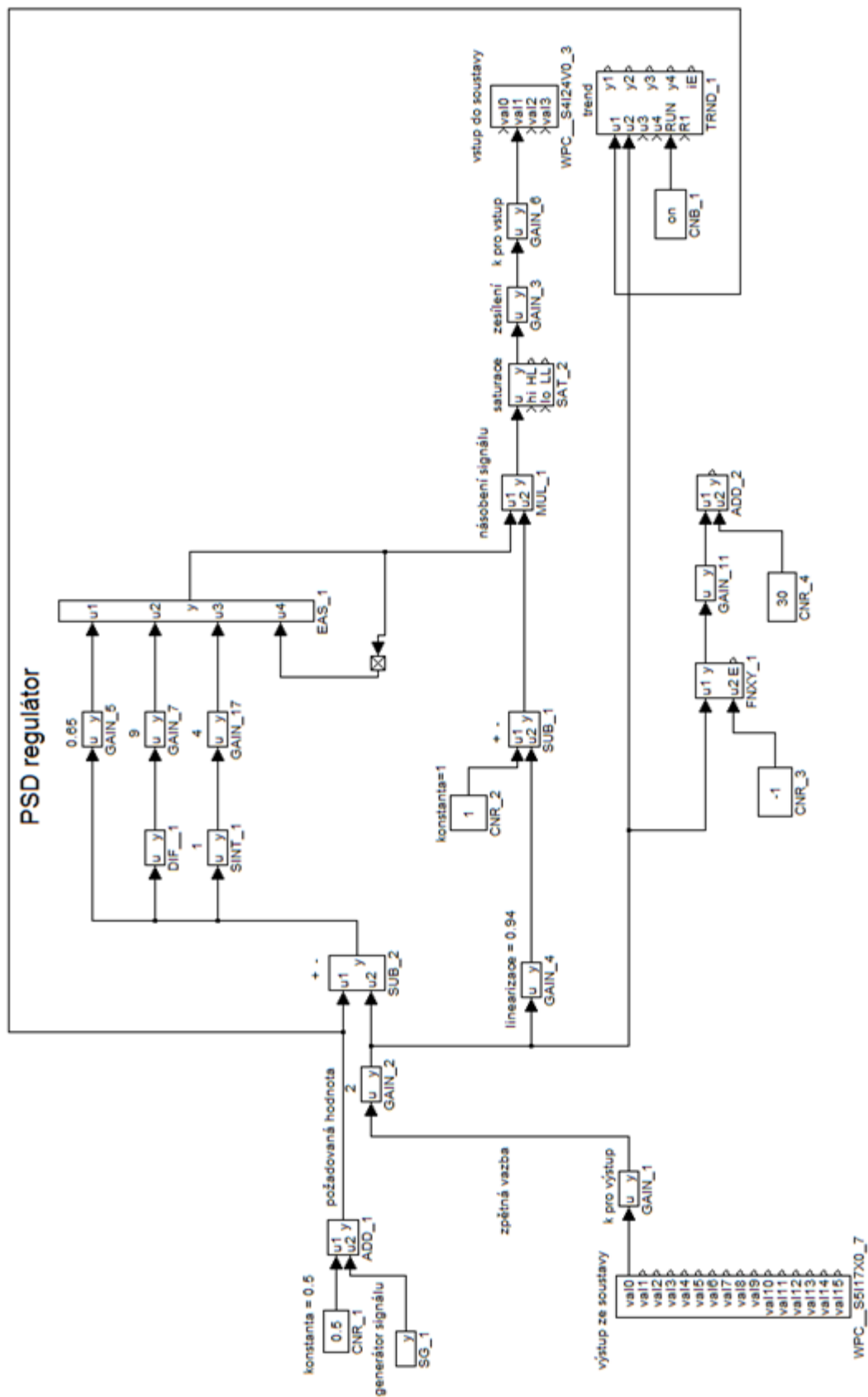
- [1] www.rexcontrols.cz [online]. 2000 [cit. 2011-05-03]. REX controls. Dostupné z WWW: <www.rexcontrols.cz>.
- [2] REX CONTROLS, S.r.o. Funkční bloky systému REX : Referenční příručka. Verze 2.01. Plzeň , 16.3.2011. 275 s
- [3] **HUMUSOFT**, TQ. MAGNETIC LEVITATION MODEL : CE 152. User's manual,revision 3.1 2006. 53 s.
- [4] VÍTEČKOVÁ, M. - VÍTEČEK, A. Základy automatické regulace. 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 243 s. ISBN 978-80-248-1924-2.
- [5] VAVŘÍN, P. Teorie automatického řízení I. (Lineární spojité a diskrétní systémy). 2. přepracované vyd. Brno: VUT Brno, 1991. 158 s. ISBN 80-214-0244-X.
- [6] www.icpdas.com [online]. 2005, 2011 [cit. 2011-05-03]. ICP DAS. Dostupné z WWW: <<http://www.icpdas.com/home.htm>>.
- [7] ZÍTEK, P. - HOFREITER, M. - HLAVA, J. Automatické řízení. 2. vyd. přeprac. Praha: CVUT, 1999.148 s. ISBN 80-01-02044-4.
- [8] ŠULC, B. Teorie automatického řízení s počítačovou podporou. 1. vyd. Praha: CVUT, 1999. 154 s. ISBN 80-01-01974-8.
- [9] Prof. Ing. Vilém Srovnal, CSc. REGULAČNÍ SYSTÉMY. 1. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava : [s.n.], 2005. 250 s.
- [10] REX CONTROLS, S.r.o. Začínáme se systémem REX. Revize 2. Plzeň, říjen 2010. 11 s.
- [12] [Www.pidlab.com/](http://www.pidlab.com/) [online]. [cit. 2011-05-03]. PID CONTROLLER LABORATORY. Dostupné z WWW: <<http://www.pidlab.com/en/home>>.
- [13] BALÁTEĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha. TECHNICKÁ LITERATURA BEN, 2003. 649 s. ISBN 80-7300-020-2.

Přílohy

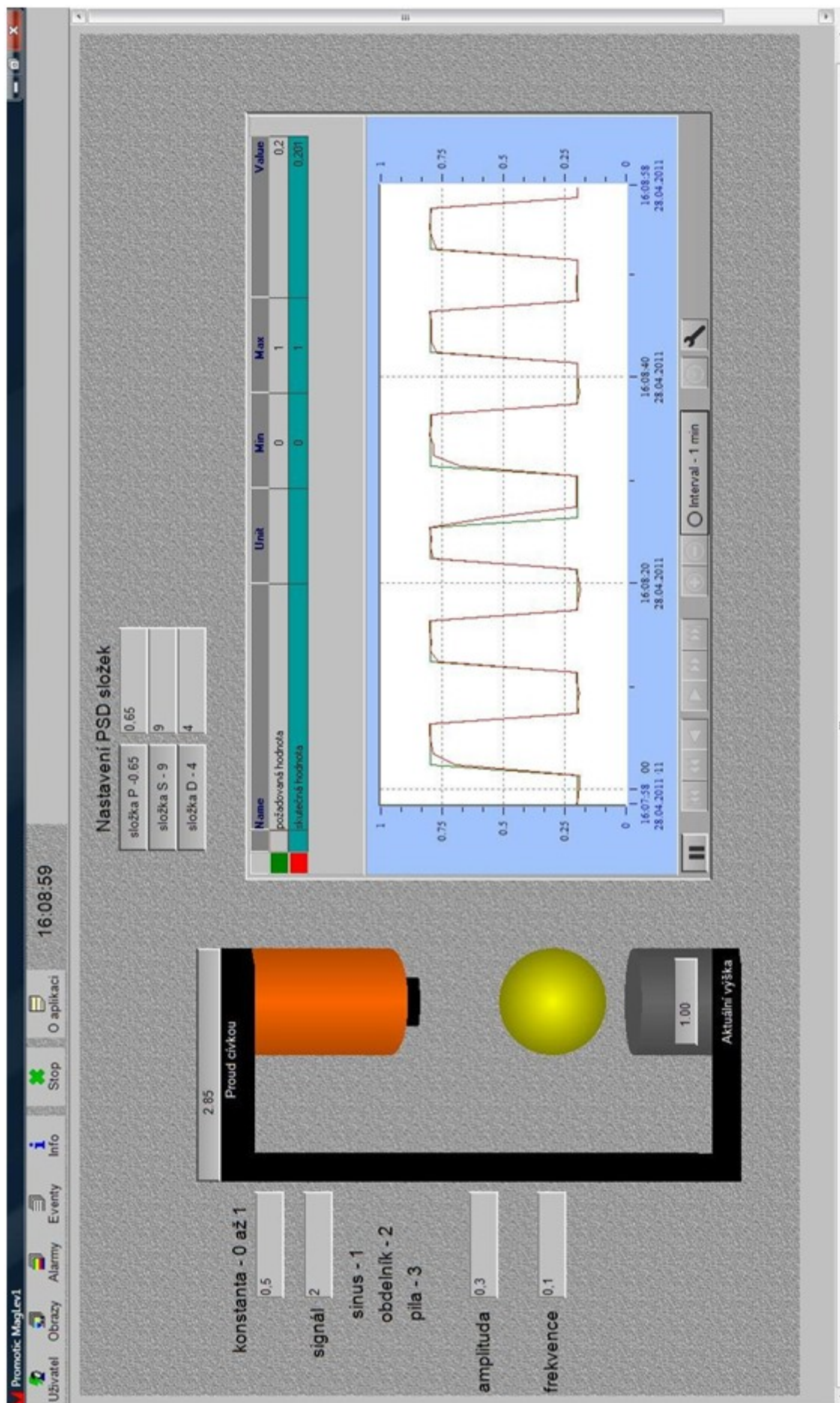
Obr. 1 Schéma regulačního obvodu v prostředí RexDraw

Obr. 2 Obrazovka z vizualizace

Obr. 3 Simulační schéma v MATLAB simulink



Obr. 1 Schéma regulačního obvodu v prostředí RexDraw



Obr. 2 Obrazovka z vizualizace

